

Defining Purpose and Scope for Environmental Analysis Life Cycle Cement in Ecuador

Daniel Salas Márquez¹, Daniel Petroche Sánchez¹, Angel D. Ramírez, Ph.D.¹, Carlos R. Rodríguez, Ph.D.¹, Andrea Boero Vera, M.Sc.¹, Ana Meléndres Palma, Ing.¹ and Jorge Duque-Rivera, M.Sc.¹

¹ Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Ecuador, dasalas@espol.edu.ec, dpetroch@espol.edu.ec, aramire@espol.edu.ec, crodrigu@espol.edu.ec, aboero@espol.edu.ec, amelendr@espol.edu.ec, jduque@espol.edu.ec

Abstract– The concern regarding the impact of the greenhouse gas emissions has been increasing in the last years due to the increasing global warming awareness.

Several studies regarding life cycle inventories of cement production have been carried on around the world, but Ecuador still does not count with a comprehensive life cycle inventory of their cement production.

Due to the local origin of the raw materials of cement production, is mandatory to elaborate a Life Cycle Assessment LCA for the specific geologic, industrial and environmental conditions of the country.

This study defines the goal and scope for the elaboration of a LCA of the cement production in Ecuador based on the ISO14040-14044 guidelines. The functional unit, the system limits, the impact categories and the data quality are described.

Keywords— Cement, Life Cycle Assessment, Ecuador, environmental impact, global warming.

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.185>

ISBN: 13 978-0-9822896-8-6

ISSN: 2414-6668

13th LACCEI Annual International Conference: “Engineering Education Facing the Grand Challenges, What Are We Doing?”
July 29-31, 2015, Santo Domingo, Dominican Republic

ISBN: 13 978-0-9822896-8-6

ISSN: 2414-6668

DOI: <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.185>

Definición de Objetivo y Alcance para el Análisis de Ciclo de Vida Ambiental del Cemento en el Ecuador

Daniel Salas Márquez¹, Daniel Petroche Sánchez², Angel D. Ramírez, Ph.D.^{3,*}, Carlos R. Rodríguez, Ph.D.⁴, Andrea Boero Vera, M.Sc.⁵, Ana Meléndres Palma, Ing.⁶ y Jorge Duque-Rivera, M.Sc.⁷

¹ Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador, dasalas@espol.edu.ec

² Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador, dpetroch@espol.edu.ec

³ Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador, aramire@espol.edu.ec

⁴ Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador, crodrigu@espol.edu.ec

⁵ Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador, aboero@espol.edu.ec

⁶ Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador, amelendr@espol.edu.ec

⁷ Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador, jduque@espol.edu.ec

Resumen— *La preocupación por el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero en el mundo se ha incrementado en los últimos años debido al crecimiento de la conciencia del calentamiento global.*

Se han escrito artículos dedicados exclusivamente al estudio de inventarios y de análisis de ciclo de vida (LCA) de cemento, mientras que Ecuador no posee datos cualitativos de LCA de Cemento.

Debido a que las materias primas del cemento son autóctonas del Ecuador, es necesario realizar una Evaluación del Ciclo de Vida con las condiciones geológicas, industriales y ambientales específicas del país.

El presente trabajo define el objetivo y alcance para la realización del Análisis de Ciclo de Vida de la producción de cemento en el Ecuador basándose en los lineamientos de la norma ISO14040-14044. La unidad funcional, los límites del sistema, las categorías de impacto y la calidad de datos son establecidas.

Palabras Claves— *Cemento, Análisis de Ciclo de Vida, Ecuador, impacto ambiental, calentamiento global.*

Abstract.- *The concern regarding the impact of the greenhouse gas emissions has been increasing in the last years due to the increasing global warming awareness.*

Several studies regarding life cycle inventories of cement production have been carried on around the world, but Ecuador still does not count with a comprehensive life cycle inventory of their cement production.

Due to the local origin of the raw materials of cement production, is mandatory to elaborate a Life Cycle Assessment LCA for the specific geologic, industrial and environmental conditions of the country.

This study defines the goal and scope for the elaboration of a LCA of the cement production in Ecuador based on the ISO14040-14044 guidelines. The functional unit, the system limits, the impact categories and the data quality are described.

Keywords.- *Cement, Life Cycle Assessment, Ecuador, environmental impact, global warming.*

I. INTRODUCCIÓN

Durante el último siglo, el cemento ha sido la materia prima más utilizada en la construcción. La fabricación del mismo origina aproximadamente el 5% de las emisiones globales antropogénicas de CO₂ [1].

La cantidad de cemento producido por cada humano en el mundo llega a ser en promedio aproximadamente 1 tonelada [2] y su manufactura implica el uso de grandes cantidades de energía y materia prima [3], [4].

Debido a tales requerimientos de materia prima, la industria del concreto es la más grande consumidora de recursos naturales limitados como agua, grava, arena o rocas trituradas [5]. A parte de esto, según Tu, Chen y Hwang, después el 2010, la industria consumiría de 8 a 12 mil millones de toneladas de agregados naturales anualmente [6].

Proyecciones de las emisiones globales de CO₂ indican que las emisiones aumentarían un 2.5% en el 2014. Del total de emisiones, China, seguida de Estados Unidos, la Unión Europea e India, representaron en su conjunto aproximadamente un 59% de las emisiones globales del año 2013 [7].

Debido a su abundancia en el mercado, el análisis de las implicaciones ambientales del hormigón y su materia prima, el cemento, se vuelve cada vez más relevante.

En el Ecuador, los productores de cemento se basan en la normativa para la fabricación de cementos hidráulicos compuestos INEN 2380, dichos cementos, a diferencia de los cementos Portland Puros, contienen un porcentaje de puzolana, reduciendo el porcentaje de Clinker, principal compuesto del cemento y que la producción del mismo emite la mayor cantidad de CO₂.

El Cemento Hidráulico Tipo GU, producido bajo la norma INEN 2380 es el cemento más utilizado en la construcción convencional del Ecuador y está compuesto principalmente por Clinker, Yeso y Puzolanas, que para el caso particular de la producción ecuatoriana, corresponde a cenizas volcánicas.

El aporte principal de la presente investigación es proveer un objetivo y alcance para el Análisis del Ciclo de Vida del Cemento en Ecuador, definiendo aportes y limitantes, dado que el origen de las materias primas para la producción de cemento en el Ecuador proviene de fuentes locales, la disposición y el dimensionamiento de la tecnología con la cual se fabrica el cemento en el país son diferentes que en otras regiones, es necesario evaluar el Ciclo de Vida del mismo considerando sus propias condiciones geológicas, industriales y ambientales, conduciendo correctamente a futuras investigaciones relacionadas con construcción sostenible y análisis de ciclo de vida en Ecuador y la región.

II. IMPACTOS AMBIENTALES DEL CEMENTO

Aparte de CO₂, la industria del cemento genera también, entre otros, emisiones de monóxido de carbono y metales pesados [8]. Actividades como la minería y procesos industriales, son la principal fuente de contaminación por metales pesados [9]. Las cantidades de la formación fotoquímica de ozono, metales pesados y cancerígenos debidos a la producción de cemento, dependen altamente de los combustibles y materia prima utilizados; siendo fuentes principales los procesos de producción de energía como la producción de electricidad y el refinamiento de combustibles [10]. El impacto principal de la producción de cemento sobre la calidad de los suelos viene de: la minería intensiva, el manejo de los desechos, el almacenamiento de distintos tipos de materiales y deposición atmosférica [9]. La acidificación es principalmente causada por las emisiones de NO_x y SO₂, y depende principalmente en el contenido de clínker del cemento. Las emisiones de NO_x son también la principal causa de eutrofización [10]. Las principales fuentes de esmog son las emisiones de SO₂, polvo y hollín. La minería y la preparación de recursos energéticos en los países de origen han

influenciado disparidad en los resultados obtenidos concernientes al esmog [10]. Los niveles de materiales naturalmente radiactivos, NORM por sus siglas en inglés, y de 19 elementos traza debido a la manufactura de cemento fueron evaluados por Al-Dadi y se encontró que los niveles de estos elementos traza presentan grandes rangos de valores, mientras que los niveles de NORM dependen de las minas de origen de la materia prima [9].

Las emisiones de CO₂ son la principal causa del efecto invernadero relacionado con la producción de cemento, representando entre el 98.8 y 100% de su totalidad. Otros gases como el CH₄ y NO₂ tienen una menor influencia a pesar de tener factores de caracterización mayores [10].

Los factores que inducen cambios en el efecto invernadero relacionado a la producción de cemento fueron identificados por Wang y otros y son los siguientes: factor de efecto de emisión de energía, de efecto de estructura de energía, efecto de intensidad, efecto de la actividad de producción de cemento y efecto de la actividad de producción de clínker [11]. Los factores relacionados con la producción de clínker y de cemento fueron dominantes en el incremento de las emisiones de efecto invernadero, mientras que el factor de efecto de intensidad de energía las reduciría [11].

La carga ambiental de la manufactura de cemento depende también de la capacidad de producción de la planta [12]. Chen y otros analizaron la producción de cemento con horno rotatorio seco de alta, moderada y baja capacidad, encontrando un mayor impacto ambiental por masa de cemento producida en para la mayoría de categorías de impacto en los escenarios de producción moderada que en los de alta y baja capacidad de producción. El escenario de alta capacidad de producción generó la menor carga ambiental en todas las categorías, exceptuando calentamiento global. El escenario de baja producción presentó el valor más bajo en la categoría de calentamiento global [12].

El efecto de carbonatación implica una reducción en las emisiones de CO₂ que puede llegar a ser significativa, por lo que García-Segura y otros consideran que este efecto debe ser tomado en cuenta al elaborar un análisis de ciclo de vida para obtener resultados confiables [13]. La carbonatación durante el

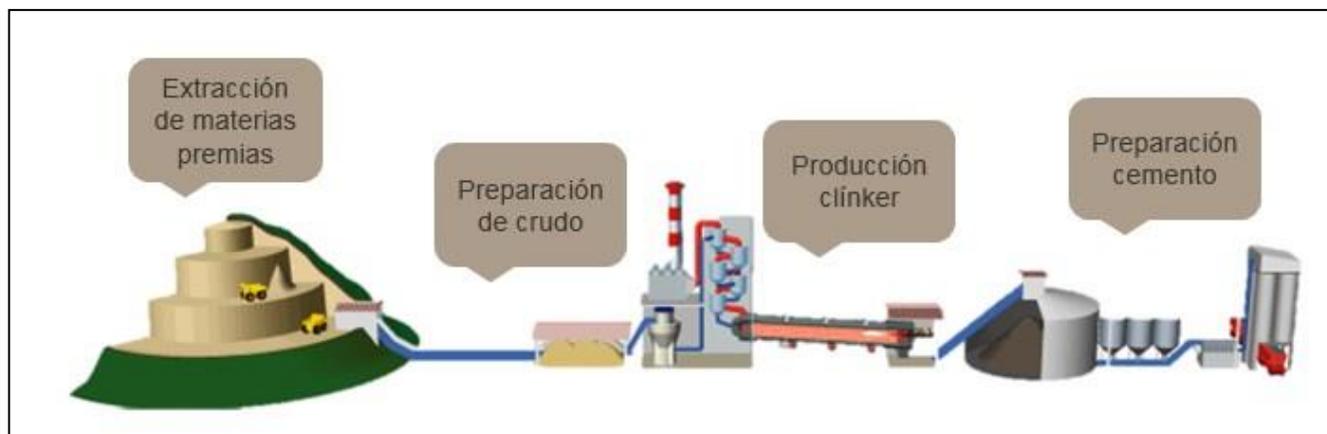


Fig. 1 Proceso General de producción de Cemento Cradle-to-gate.

uso de cemento Portland puede representar hasta un 22% del total de emisiones de CO₂, llegando hasta un 47% de reducción de emisiones si el concreto es reciclado luego de ser demolido. Para el caso de concretos con cenizas volantes la carbonatación representa el 41% de emisiones de CO₂ y para el concreto con escoria de alto horno, el 20% [13]. Proske y otros mostraron que, para el mismo esfuerzo, la mezclas de concreto que utilizaron piedra caliza están asociadas a una menor profundidad de carbonatación que los concretos con cenizas volantes [14].

III. MARCO TEÓRICO

A. Producción Del Cemento Hidráulico Compuesto [15]:

El cemento se produce por la pulverización de su materia prima, el clínker, el cual se compone principalmente en silicatos de calcio hidráulicos. El clínker además contiene algunos aluminatos de calcio y ferroaluminatos de calcio y yeso y adiciones minerales (Puzolana) que se mezcla juntamente con el clínker para la fabricación del producto final. El proceso total de producción de cemento se puede dividir en cuatro etapas: Extracción de materias primas, preparación del crudo, producción de Clinker, y preparación de cemento (Fig. 1).

1) *Extracción de Materias Primas*: Las materias primas seleccionadas se extraen de la cantera y se transportan.

2) *Preparación de crudo*: Las materias primas se trituran, se muelen, se dosifican y se mezclan de tal manera que el crudo resultante tenga la composición deseada.

El crudo es generalmente una mezcla de calizas, arcillas, arenas y fluorita.

3) *Producción de clínker*: Después del mezclado, se alimenta la materia prima molida hacia un pre-calentador que opera con los gases residuales del horno rotatorio, elevando la temperatura de la mezcla a 650°C. Luego, el crudo pasa a lo largo del horno rotatorio en una tasa controlada por la velocidad de rotación del horno y la inclinación del mismo. El combustible (Pet coque, Diesel) se fuerza hacia la zona inferior del horno, donde la temperatura aproximada de 1450°C transforman químicamente el material de crudo en clínker.

4) *Preparación de cemento*: Después de esto, el clínker se lleva a su etapa de enfriamiento y de pulverización.

Durante este proceso, se adiciona pequeñas cantidades de yeso, para controlar el tiempo de fraguado del cemento y adiciones minerales (Puzolana) para aumentar la durabilidad.

En el molino, el clínker se muele de manera tan fina que puede pasar a través de un tamiz de 45 micrómetros (malla No. 325). Este extremadamente fino polvo gris es el cemento hidráulico compuesto.

B. Análisis de Ciclo de Vida

El análisis de ciclo de vida es una herramienta cuantitativa, cuyo objetivo es evaluar la carga ambiental de un producto en todas las etapas de su ciclo de vida mediante la

compilación y posterior evaluación de entradas, salidas e impactos ambientales del sistema. La aplicación del LCA ha demostrado ser útil para evaluar la eficiencia del uso de materiales y energía de un sistema, las variaciones de los niveles de contaminación entre distintos procesos y para proveer marcos de referencia en los cuales basar medidas de mejoramiento [16]. Esta herramienta de análisis está basada en los lineamientos de la norma ISO14040-14044, la cual especifica cuatro pasos principales para su elaboración, los cuales son: Definición de Objetivos y Alcance, Análisis de Inventario de Ciclo de Vida, Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida, e Interpretación de Ciclo de Vida (Fig. 2).

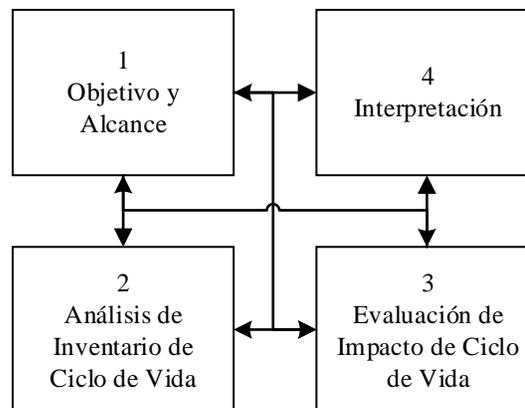


Fig. 2 Marco de Evaluación de Ciclo de Vida - ISO 14040

1) *Definición de objetivos y alcance*: Se definen el propósito del estudio, la unidad funciona y los límites del sistema.

2) *Análisis de inventario*: Se realiza la recopilación de datos de entradas y salidas y se elabora un inventario de flujos.

3) *Análisis de impacto*: Los resultados obtenidos en la etapa anterior se utilizan para calcular los impactos ambientales, los cuales se ubican en las categorías de impacto elegidas.

4) *Interpretación*: Se elaboran conclusiones recomendaciones a partir de los resultados previamente obtenidos.

Las etapas de un ciclo de vida incluyen: Extracción de materias primas, producción de material, partes del producto y el producto en sí, uso y reciclaje o disposición final. Sin embargo, un LCA no necesariamente debe elaborarse tomando en cuenta todas estas etapas, el enfoque del estudio depende de las características del producto. En el caso del cemento, por ejemplo, debido a que este producto tiene distintas aplicaciones luego de salir de la planta de producción y no nos permite la consideración de un ciclo de vida único hasta su disposición final, se prefiere un LCA con un enfoque de la cuna a la puerta de la planta, es decir, excluyendo las etapas de uso y disposición final. Un LCA con este enfoque sería de todas formas útil para la posterior elaboración de un LCA más completo de productos hechos a base de cemento como, por ejemplo, columnas o pavimento [17].

IV. OBJETIVO

El presente artículo presenta una propuesta para definir el objetivo y alcance, que sirva de línea base para, en investigaciones futuras, cuantificar el desempeño ambiental de la producción de cemento uso general en el Ecuador. Para esto se utilizará el marco metodológico de análisis de ciclo de vida (LCA).

El producto a analizarse es el cemento, el cual es un conglomerante que se forma a partir de una mezcla de arcilla y caliza calcinadas, seguidamente molidas, que tiene la propiedad de endurecer al contacto con el agua (Neville, 2010). Específicamente el cemento hidráulico compuesto elaborado bajo la normativa INEN 2380.

El presente estudio puede ser utilizado por agencias gubernamentales, el sector de la industria cementera y otros sectores estratégicos como herramienta para incorporar aspectos ambientales globales en la toma de decisiones y planificación. Cabe señalar que el inventario de ciclo de vida a desarrollarse constituye un elemento indispensable para toda evaluación de ciclo de vida en la que el cemento ecuatoriano constituya un insumo, por lo que los resultados del proyecto adquieren una especial relevancia.

V. ALCANCE DEL PROYECTO

A. Unidad Funcional

La unidad funcional es la unidad de referencia en el LCA para la cual se calculan todos los impactos ambientales del producto. La unidad funcional puede variar en distintos estudios y ser de un nivel material, como en el análisis de la producción de cemento, o de un nivel estructural, como en el análisis de una columna [18].

La unidad funcional de análisis en este estudio es “1 tonelada de cemento hidráulico compuesto (INEN 2380)”, que es una cantidad conveniente de uso frecuente en la presentación de informes de consumo de energía y materiales, así como las emisiones.

B. Diagrama de flujo y Fronteras de sistema

El alcance del proyecto se centra en la adquisición de materia prima, procesamiento y etapas de fabricación del producto (Fig. 1).

El producto examinado tiene un ciclo de vida, comenzando con la extracción de la materia prima hasta el embalaje y el envío del producto acabado.

Evaluaciones completas del ciclo de vida también incluyen el uso y las etapas de eliminación de los productos. Sin embargo, puesto que no contamos con datos de post fabricación como uso y deposición del cemento, estas etapas

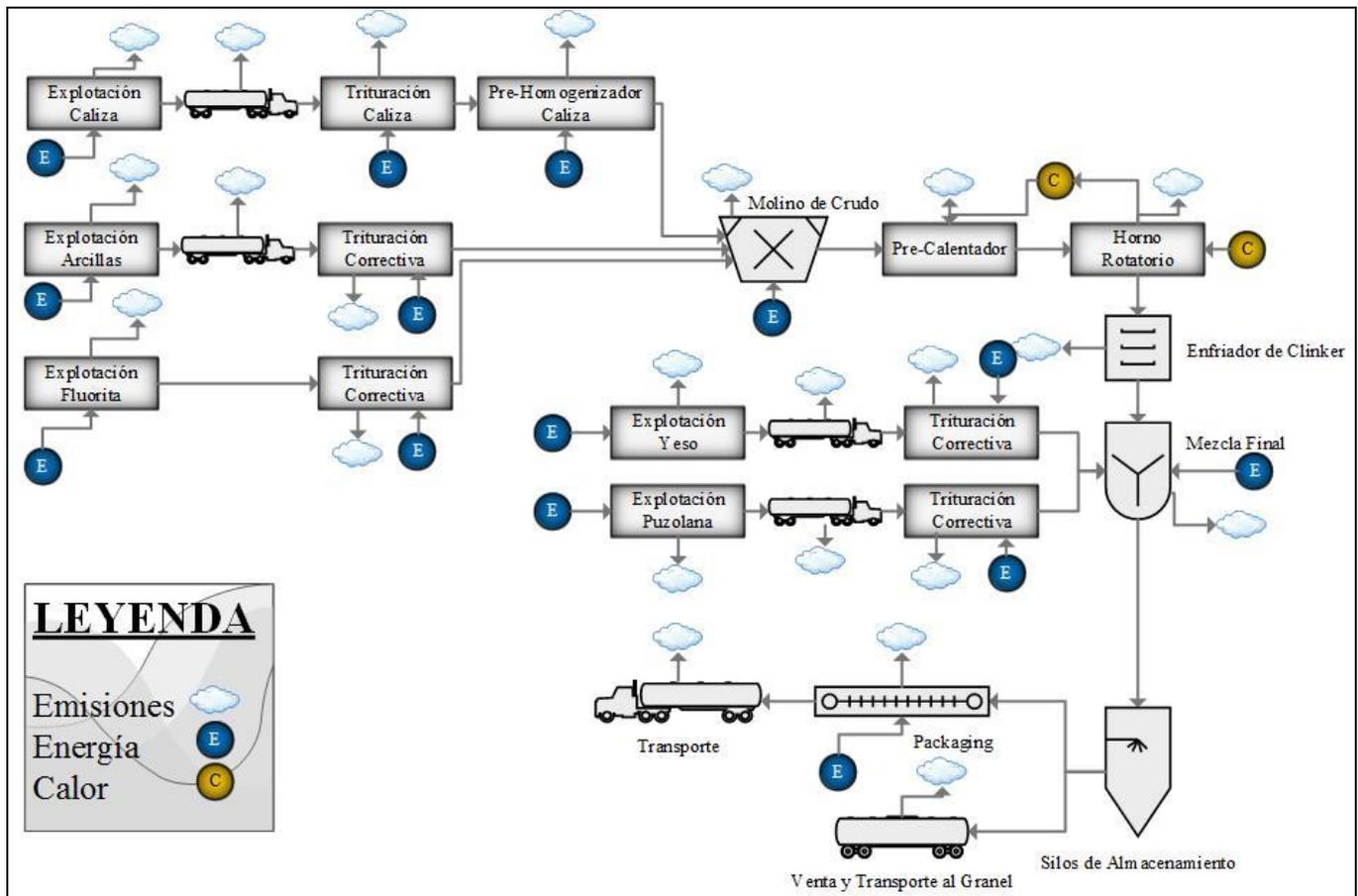


Fig. 3 Diagrama de Flujo de la Producción de Cemento Hidráulico Compuesto.

de la LCA no son examinados en este estudio.

El alcance general de este estudio incluye las etapas descritas en las Figuras 1 y 3. Varias de las etapas de procesamiento se han combinado para simplificar el análisis y el cálculo de los elementos de inventario.

C. Selección de Categorías de Impacto

1) *Agotamiento de Recursos*: Los métodos de caracterización dependen del tipo de recurso de interés, los cuales pueden ser divididos en renovables y no-renovables; o, bióticos y abióticos. También se distingue si los recursos son depósitos, fondos o flujos. Los depósitos corresponden a recursos que no pueden ser regenerados a lo largo del tiempo de vida de los humanos, también llamados no renovables, y entre ellos podemos considerar a los combustibles fósiles, minerales, arcillas, entre otros. Los fondos, como el agua subterránea, pueden ser regenerados a lo largo del tiempo de una vida humana y los flujos, como los ríos o la energía solar, también llamados renovables, se regeneran constantemente. Cuando el enfoque está centrado en el agotamiento de los recursos, los modelos de caracterización consideran el tamaño de las reservas y las tasas de extracción. Otra forma de proceder, no tan frecuente, es utilizar la termodinámica y realizar el análisis en términos de energía utilizable. Otro tipo de analizar depósitos de recursos se centra en el análisis de las futuras posibilidades de extracción [19].

2) *Uso de Suelo*: Incluye la ocupación y extracción de recursos y el análisis de en qué medida esto conduce a cambios en la biodiversidad y afectación a la vida en la zona. Para medir la ocupación de tierra se considera el área utilizada en un periodo de tiempo dado, por ejemplo en metros cuadrados por año. Por otro lado, la transformación de la tierra, debido a que implica un mayor número de variables a considerar, es más complicada de analizar. Por ejemplo, la diferencia entre la cantidad promedio de especies de plantas en la zona de interés comparada con la cantidad promedio en la región puede ser utilizada como modelo de caracterización [19].

3) *Cambio Climático*: El CO₂, el metano, los clorofluorocarbonos (CFC), el óxido nitroso, entre otros, son gases que generan calentamiento global. La caracterización de los gases de efecto invernadero se centra en la medida en que estos afectan la absorción de radiación de la atmósfera y se mide con el coeficiente de calentamiento global, GWP por sus siglas en inglés. El GWP de una sustancia es definida como el ratio entre el aumento de absorción de radiación infrarroja que causa la sustancia y el que causa el CO₂. Los GWP utilizados para el LCA, han sido desarrollados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), y existe una lista constantemente actualizada con los mejores valores estimados [19].

4) *Agotamiento de la Capa de Ozono*: Se refiere al adelgazamiento de la capa estratosférica de ozono causado por sustancias clorinadas y bromadas como los gases CFC y halones. Los Potenciales de Agotamiento de Ozono (ODP)

utilizados en LCA fueron desarrollados por la Organización Mundial de Meteorología (WMO) y sus valores son actualizados constantemente [19].

5) *Formación Foto-oxidante*: Los foto-oxidantes son contaminantes secundarios producidos en la atmósfera baja por NO_x e hidrocarburos en presencia de luz solar. Estas sustancias son características del smog fotoquímico, el cual es una causa conocida de problemas respiratorios y daño a la vegetación. El fenómeno de smog depende altamente en condiciones meteorológicas y en las concentraciones de contaminantes y puede ser convertirse en un problema a escala regional si el ozono formado es transportado por los vientos. Los métodos de caracterización utilizados en LCA se enfocan en impactos regionales, pero también se pueden describir efectos locales a corto plazo durante temporadas pico. El ozono es formado cuando están presentes concentraciones de NO_x y luz solar [19].

6) *Acidificación*. Los contaminantes más acidificantes son el SO₂, NO_x, HCl y NH₃. La lluvia ácida es una de las formas en que ocurre la deposición ácida, la cual también puede ocurrir en niebla o nieve. El potencial de acidificación (AP) en el análisis de ciclo de vida se define como el número de iones H⁺ producidos por kg de la sustancia relativo al producido por Kg de SO₂ [19].

7) *Eutrofización*. Este efecto se asocia con los impactos ambientales de niveles excesivamente altos de nutrientes que puedan generar un aumento en la productividad biológica. La eutrofización puede influenciar ecosistemas terrestres y acuáticos y los nutrientes más representativos que generan este efecto son el nitrógeno y el fósforo. Debido a que cada ecosistema está limitado por ciertos nutrientes, la eutrofización varía geográficamente [19].

D. Requisitos de Calidad de Datos

Los requisitos de calidad de los datos deben cubrir la cobertura temporal (antigüedad de los datos utilizados), la cobertura geográfica (local, regional, nacional, continental, global, etc.), la cobertura tecnológica (mejor tecnología disponible, media ponderada de tecnologías, etc.), la precisión, amplitud y representatividad de los datos, la consistencia y reproducibilidad de los métodos usados en el LCA, las fuentes bibliográficas de los datos y su representatividad, y la incertidumbre de la información.

Descripción general de los tipos de datos recopilados:

1) *Los datos comprenden:*

Datos mensuales de producción de crudo, clínker y cemento y consumo de combustibles, electricidad y materia prima por cada proceso.

Caracterización de emisiones al aire de las principales fuentes fijas de combustión, incluyendo caudal de gases, carga de operación de la fuente, fecha y hora de monitoreo.

Insumos utilizados durante la operación y mantenimiento de la planta cementera y procedencia de los mismos.

Estadísticas de cemento producido por hora.

2) Fuente:

Datos solicitados a la industria.
Auditorías ambientales realizadas por el sector público.
Información y datos de artículos científicos.

3) Cobertura temporal:

Los datos corresponden a la producción de cemento con la normativa actual

4) Cobertura geográfica:

Planta que contribuye con la producción del 60% del consumo total del cemento en el Ecuador.

E. Descripción Cualitativa de Entradas y Salidas a lo largo del Ciclo de Vida del Cemento.

En la Tablas I se presentan los flujos de entrada y salida de materia y energía para los procesos: Extracción y Trituración de Materias Primas, Molienda de Crudo, Pre-calentamiento, Clinkerización, Enfriamiento de Clinker, Preparación de Cemento.

TABLA I
FLUJOS DE ENTRADA Y SALIDA

		Entradas	Salidas
Extracción y trituración de materia prima	Flujo Natural	Calizas Arcillas Fluoritas Yeso Puzolana	CO2 Material Particulado
	Flujo de producto	Diésel Aceites Energía Eléctrica	Calizas Trituradas Arcillas Trituradas Fluoritas Trituradas Yeso Explotado Puzolana Triturada
Molienda de Crudo	Flujo Natural		CO2 Material Particulado
	Flujo de Producto	Calizas Trituradas Arcillas Trituradas Fluoritas Trituradas Aceites Energía Eléctrica	Crudo

		Entradas	Salidas
Pre-Calentamiento	Flujo Natural		CO2 Material Particulado
	Flujo de Producto	Crudo (Temperatura Ambiente) Calor Reciclado Energía Eléctrica	Crudo (600 °C)
Clinkerización	Flujo Natural		CO2 Material Particulado
	Flujo de Producto	Crudo (600 °C) Pet Coque Diésel Aceites Biomasa Energía Eléctrica	Clínker (1450 °C) Calor Reciclado
Enfriamiento De Clíner	Flujo Natural		CO2 Material Particulado
	Flujo de Producto	Clínker (1450 °C) Aceites Energía Eléctrica	Clínker (35 °C)
Preparación de Cemento	Flujo Natural		CO2 Material Particulado
	Flujo de Producto	Clínker (35 °C) Yeso Explotado Puzonala Triturada Aceites Energía Eléctrica	Cemento Hidráulico Compuesto

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. D. Eatmon, "A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies," *J. Clean. Prod.*, vol. 17, no. 7, pp. 668–675, May 2009.
- [2] A. S. Lippiatt B, "Measuring the life-cycle environmental and economic performance of concrete: the BEES approach," *Int. Workshop Sustain. Dev. Concr. Technol. Beijing*, May 2004.
- [3] A. C. P. Hendrik G. Oss, "Cement Manufacture and the Environment: Part I: Chemistry and Technology," *J. Ind. Ecol. - J IND ECOL*, vol. 6, no. 1, pp. 89–105, 2002.
- [4] Z. Nie, "Development and application of life cycle assessment in China over the last decade," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 18, no. 8, pp. 1435–1439, Jul. 2013.
- [5] H. Mefteh, O. Kebaïli, H. Oucief, L. Berredjem, and N. Arabi, "Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 54, pp. 282–288, Sep. 2013.
- [6] T.-Y. Tu, Y.-Y. Chen, and C.-L. Hwang, "Properties of HPC with recycled aggregates," *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 5, pp. 943–950, May 2006.
- [7] C. Le Quéré, G. P. Peters, R. J. Andres, R. M. Andrew, T. A. Boden, P. Ciais, P. Friedlingstein, R. A. Houghton, G. Marland, R. Moriarty, S. Sitch, P. Tans, A. Arneeth, A. Arvanitis, D. C. E. Bakker, L. Bopp, J. G. Canadell, L. P. Chini, S. C. Doney, A. Harper, I. Harris, J. I. House, A. K. Jain, S. D. Jones, E. Kato, R. F. Keeling, K. Klein Goldewijk, A. Körtzinger, C. Koven, N. Lefèvre, F. Maignan, A. Omar, T. Ono, G.-H. Park, B. Pfeil, B. Poulter, M. R. Raupach, P. Regnier, C. Rödenbeck, S. Saito, J. Schwinger, J. Segsneider, B. D. Stocker, T. Takahashi, B. Tilbrook, S. van Heuven, N. Viovy, R. Wanninkhof, A. Wiltshire, and S. Zaehle, "Global carbon budget 2013," *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 6, no. 1, pp. 235–263, Jun. 2014.
- [8] Y. Lei, Q. Zhang, C. Nielsen, and K. He, "An inventory of primary air pollutants and CO₂ emissions from cement production in China, 1990–2020," *Atmos. Environ.*, vol. 45, no. 1, pp. 147–154, Jan. 2011.
- [9] M. M. Al-Dadi, H. E. Hassan, T. Sharshar, H. A. Arida, and H. M. Badran, "Environmental impact of some cement manufacturing plants in Saudi Arabia," *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 302, no. 3, pp. 1103–1117, Sep. 2014.
- [10] A. Josa, A. Aguado, A. Cardim, and E. Byars, "Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 5, pp. 781–788, May 2007.
- [11] Y. Wang, Q. Zhu, and Y. Geng, "Trajectory and driving factors for GHG emissions in the Chinese cement industry," *J. Clean. Prod.*, vol. 53, pp. 252–260, Aug. 2013.
- [12] W. Chen, J. Hong, and C. Xu, "Pollutants generated by cement production in China, their impacts, and the potential for environmental improvement," *J. Clean. Prod.*, 2014.
- [13] T. García-Segura, V. Yepes, and J. Alcalá, "Life cycle greenhouse gas emissions of blended cement concrete including carbonation and durability," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 19, no. 1, pp. 3–12, Jul. 2013.
- [14] T. Proske, S. Hainer, M. Rezvani, and C.-A. Graubner, "Eco-friendly concretes with reduced water and cement contents — Mix design principles and laboratory tests," *Cem. Concr. Res.*, vol. 51, pp. 38–46, Sep. 2013.
- [15] K. Kosmatka and Paranes, *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. 2004.
- [16] S. Ross, D. Evans, and M. Webber, "How LCA studies deal with uncertainty," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 7, no. 1, pp. 47–52, Jan. 2002.
- [17] C. Chen, G. Habert, Y. Bouzidi, and A. Jullien, "Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation," *J. Clean. Prod.*, vol. 18, no. 5, pp. 478–485, Mar. 2010.
- [18] P. Van den Heede and N. De Belie, "Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 4, pp. 431–442, Apr. 2012.
- [19] A.-M. T. Henrikke Bumann, *The Hitch Hiker's Guide to LCA*. Studentlitteratur, 2004.